

ارزیابی تجربی خواص ترموفیزیکی، انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده

محمد همت اسفه^{۱*}، مجتبی بیگلری^۲، سیف الله سعدالدین^۳، سید هادی رستمیان^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۲۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴	
واژگان کلیدی: نانولوله کربنی، نانوسیال، انتقال حرارت، ضریب هدایت حرارتی.	در این تحقیق، انتقال حرارت جابجایی نانوسیال عامل دار شده نانولوله چندجداره کربنی ^۱ -آب با عامل کربوکسیل ^۲ در کسرهای حجمی پایین در جریان مغشوش، درون یک مبدل، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. تأثیر کسر حجمی در محدوده ۰/۰۵٪ تا ۱٪ بر انتقال حرارت جابجایی در محدوده عدد رینولدز بین ۵۰۰۰ تا ۲۷۰۰۰ مطالعه شده است. همچنین ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال در دماها و کسرهای حجمی مختلف به صورت تجربی، اندازه-گیری شده است. به روشنی وابستگی شدید ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال به دما و کسر حجمی مشاهده شد. از این رو، برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال عامل دار شده نانولوله کربنی چند جداره-آب، دو مدل جدید بر مبنای برازش منحنی با داده‌های تجربی با تابعیت دما و کسر حجمی ارائه گردید. در ادامه این تحقیق، ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت، افت فشار و ضریب عملکرد برای کسرهای حجمی مختلف محاسبه و نمودارهای مرتبط با آنان معرفی شد. نتایج تجربی به روشنی نمایان می‌سازد که هر دو فاکتور ضریب انتقال حرارت و بازدهی حرارتی با افزایش کسر حجمی، افزایش می‌یابند. به طور متوسط ۷۸٪ افزایش در ضریب انتقال حرارت، ۳۶/۵٪ افزایش در عدد ناسلت متوسط و ۲۷/۳٪ تحمیل افت فشار در بالاترین کسر حجمی نانولوله کربنی چند جداره در آب، مشاهده شد.

۱-مقدمه

های فلزی، نانولوله‌ها و اکسیدهای فلزی با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر و برای نانولوله‌ها در دو بعد که ممکن است طول آن فراتر از ۱۰۰ نانومتر باشد، استفاده می‌شوند. نانوسیال که حاصل تعلیق نانوذرات در سیال پایه است، اولین بار توسط چوی [۱] معرفی شد.

روش جدیدی که پژوهشگران برای افزایش خواص حرارتی سیالات عامل حرارتی در سیستم‌های مهندسی و صنعتی دست‌یافته‌اند، تعلیق نانوذرات (و یا نانولوله) جامد در مایع است. نانوذرات معمولاً در انواع فلزات، غیر فلزات، کاربرد

^۱ MWCNT
^۲ cooh

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hemmatesfe@semnan.ac.ir

۱. دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۲. استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۳. دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۴. دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

پمپاژ جریان سیال وابسته به آن می‌باشد. مطالعات محدودی راجع به ویسکوزیته نانوسیالات با پایه کربن انجام شده است [۱۰-۱۲]. ایندهوجا و همکاران [۱۳] در تحقیق خود اثر روش تولید نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره بر ویسکوزیته نانوسیال را در مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره تولید شده با روش عامل دار کردن با اسید از ویسکوزیته پایین‌تری نسبت به نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره تولید شده با پایدارساز سدیم دودسیل سولفات^۶ برخوردار است.

مطالعات مختلفی جهت بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از نانوسیالات مختلف از جمله نانوسیالات با پایه کربن انجام شده است [۱۴-۱۹]. برای نمونه، دینگ و همکاران [۲۰] در بررسی خود برای نانوسیال آب- نانولوله کربنی مشاهده کردند که در کسر وزنی ۰/۵٪ درصد از نانولوله، بیشترین میزان افزایش به اندازه ۳۵٪ در عدد رینولدز ۸۰۰ بوده و این افزایش منحصر به افزایش هدایت حرارتی نمی‌باشد. پاک و چو [۲۱] آزمایش‌هایی را بر روی نانوسیالات اکسید آلومینیم- آب و اکسید منیزیم- آب در جریان کاملاً توسعه یافته انجام دادند. آن‌ها افزایش ۴۵٪ را در کسر حجمی ۱/۳۴٪ برای نانوسیال اکسید آلومینیم- آب و افزایش ۷۵٪ را برای ضریب انتقال حرارت در کسر حجمی ۲/۷۸٪ برای نانوسیال اکسید منیزیم- آب گزارش کردند. البته نتایج آن‌ها در کسر حجمی یکسان حاکی از بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت اکسید آلومینیم- آب نسبت به نانوسیال اکسید منیزیم- آب را نشان می‌داد. لی و ژوان [۲۲] نیز با به‌کارگیری نانوسیال مس- آب در جریان آرام و مغشوش، افزایش ۶۰٪ را برای ضریب انتقال حرارت جابجایی در کسر حجمی ۲٪ در عدد رینولدز مشابه با حالت سیال آب مشاهده نمودند.

گارج و همکاران [۲۳] نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره- آب را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش آن‌ها مربوط به تهیه این نانوسیال و همچنین میزان بهبود انتقال حرارت آن در

بالا بودن ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات در مقایسه با سیالات حرارتی موجب توسعه استفاده از نانوسیالات در کاربردهای حرارتی مختلف شده است. با مقایسه ضریب هدایت حرارتی آب (۰/۶۱ وات بر متر کلونین) و نانولوله کربنی چند جداره که تقریباً ۵۰۰۰ بار بزرگ‌تر از ضریب هدایت حرارتی آب است، تأثیر استفاده از نانوسیالات در بهینه کردن مصرف انرژی تجهیزات حرارتی نمایان می‌گردد. یکی از بهترین روش‌های بالا بردن انتقال حرارت، استفاده از سیال همراه با جزء با ضریب هدایت حرارتی بالا مانند نانولوله‌ها و گرافن است. به عبارت دیگر ترکیبات با پایه کربن به علت دارا بودن خواص حرارتی و الکتریکی منحصربه‌فرد، بهترین گزینه به‌عنوان نانوذرات در سیالات عامل مختلف می‌باشند.

بررسی خواص حرارتی نانولوله‌ها و گرافن از کارهای ضروری برای درک رفتار کلی آن‌ها می‌باشد. تاکنون، تحقیقات تجربی و تئوری زیادی در ارتباط با ضریب هدایت حرارتی نانولوله‌ها انجام شده است [۲-۷].

نسبت منظری بالا و ضریب هدایت حرارتی بالای ترکیبات با پایه کربن موجب گسترش مطالعات پیرامون این مواد شده است. لی و همکاران [۸] میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول و روغن موتور را با کسرهای حجمی مختلفی از نانولوله چند جداره مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در کسر حجمی یک درصد به میزان ۱۲/۴٪ افزایش برای نانوسیال اتیلن گلیکول- نانولوله و در کسر حجمی ۲ درصد به میزان ۳۰٪ افزایش برای نانوسیال روغن موتور- نانولوله گزارش کردند. بررسی میزان عامل کربوکسیل^۵ بر روی ضریب هدایت نانولوله چند جداره کربنی توسط طلایی و همکاران [۹] گزارش شد. نتایج آن‌ها نشان می‌داد در صورتی که سطح در طول عامل دار شدن آسیب نبیند، عامل کربوکسیل موجب بهبود ضریب هدایت حرارتی و رسیدن به پایداری بهتر می‌شود.

ویسکوزیته نیز مانند ضریب هدایت حرارتی در سیستم‌های انتقال حرارت پارامتر مهمی محسوب می‌شود زیرا قدرت

^۶SDS^۵COOH

مختلف و شکل شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۱، نشان داده شده است. این دستگاه شامل ۳ پمپ گردش جریان، محفظه آزمایش، مبدل لوله‌ای، فلومتر، فشارسنج دیفرانسیلی، شیر فرعی، مخزن آب، و دیتا لاگر (ثبات داده) دیجیتال می‌باشد.

محفظه آزمایش طوری طراحی شده است که با حجم کم نانوسیال (تقریباً ۲/۷ لیتر) بتوان بازدهی حرارتی استفاده از نانوسیال درون مبدل، را بررسی نموده و از هزینه آزمایش نیز کاسته شود. سیستم انتقال حرارت، یک لوله مسی مستقیم با طول ۱/۲ متر می‌باشد. تعدادی ترموکوپل از نوع کا (آلومل - کرومل) در تماس با سطح لوله در امتداد لوله برای اندازه‌گیری دمای دیواره تعبیه شده است. همچنین دو دماسنج مقاومتی پی‌تی‌۷ با نمایشگر دیجیتالی در قسمت ورودی و خروجی محفظه آزمایش جهت اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی نانوسیال نصب شده است. برای جلوگیری از انتقال حرارت هدایتی در راستای محور لوله، قسمت‌های ورودی و خروجی لوله مسی به وسیله مواد پلاستیکی پوشانده شد.

در دستگاه آزمایش حاضر، این طول کمتر از ۱۷ سانتی‌متر می‌باشد [۲۷] که بعد از آن، همه اندازه‌گیری‌ها در منطقه کاملاً توسعه یافته خواهد بود. برای کم کردن اتلاف حرارتی محفظه آزمایش با محیط اطراف، محفظه آزمایش به وسیله فایبرگلاس با ضخامت مشخص، عایق‌بندی شده است.

محفظه آزمایش به وسیله جریان آب داغی که بر روی لوله مسی جریان دارد، گرم می‌شود. چرخه دوم دستگاه، شامل تجهیزاتی است که دبی جریان آب داغ را در دمای موردنظر کنترل می‌کند. سیستم کنترل دمای آب داغ با استفاده از حسگر مقاومتی پی‌تی‌۷ انجام می‌شود. دو ترموکوپل نوع کا نیز برای اندازه‌گیری دمای بالک ورودی و خروجی آب داغ در محفظه آزمایش بکار رفته است.

جریان آرام بود. آن‌ها بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت را به اندازه ۳۲٪ در عدد رینولدز ۶۰۰ گزارش کردند.

اخوان بهابادی و همکاران [۲۴] یک بررسی تجربی بر روی انتقال حرارت نانوسیال در لوله مارپیچی در شرایط دمای دیواره یکنواخت انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند استفاده از لوله مارپیچی منجر به افزایش ۳ تا ۱۰ برابری میزان انتقال حرارت نسبت به حالت استفاده از سیال خالص در یک لوله معمولی خواهد شد.

به‌هرحال تنها تعداد کمی از مطالعات دربرگیرنده بررسی افت فشار نانوسیالات در کنار افزایش میزان انتقال حرارت خصوصاً برای نانوسیالات با پایه کربن دیده می‌شود [۲۵]. ژوان و همکاران [۲۶] ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک درون لوله را در هر دو رژیم جریان آرام و مغشوش بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد در کسر حجمی ۲٪، ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب-مس حدود ۶۰٪ افزایش می‌یابد در حالیکه افت فشار جریان سیال در راستای لوله در هر دو رژیم آرام و مغشوش افزایش چشمگیری نداشت.

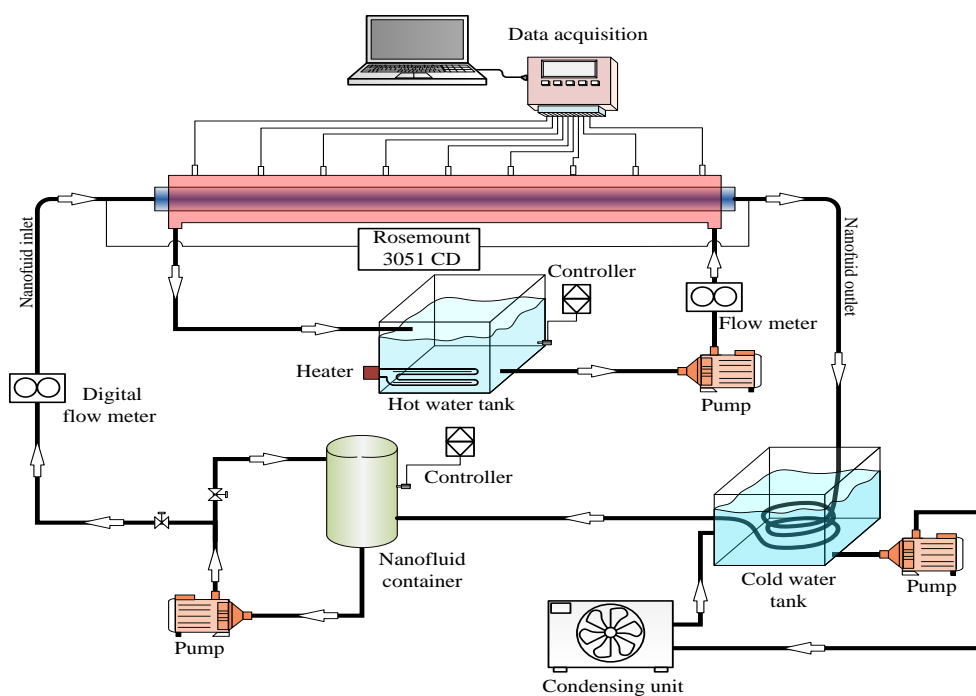
بر اساس مطالعات انجام‌شده در این زمینه، تاکنون یک بررسی جامع بر روی رفتار حرارتی و افت فشار نانولوله‌های عامل دار شده بر پایه نانوسیال انجام نشده است. مهم‌ترین هدف این تحقیق، بررسی ضریب انتقال حرارت، افت فشار و بازدهی گرمایی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده با آب در یک مبدل لوله‌ای می‌باشد. همچنین برای دستیابی به دقت بالاتر، ضریب هدایت و ویسکوزیته نانوسیال نیز در دماها و کسرهای حجمی مختلف اندازه‌گیری شده است.

۲- تشریح آزمایش

۲-۱- دستگاه و روش آزمایش

به‌منظور بررسی و ارزیابی انتقال حرارت جابجایی، افت فشار و ویژگی‌های جریان برای نانوسیالات مختلف، دستگاهی مرکب از چندین چرخه طراحی و ساخته شد. چندین نمای

RTD_PT100^۷



شکل ۱ نماهای مختلف و طرح شماتیک دستگاه آزمایش

گروه‌های عامل دار کربوکسیل برای تهیه نانولوله‌های آب-دوست و بهبود پایداری نانوسیالات در کسرهای حجمی مختلف مورد توجه قرار گرفته است. نانولوله‌های عامل دار شده با دارا بودن گروه عاملی قدم روبه‌جلو جهت اصلاح نانولوله‌ها برای استفاده بهتر می‌باشد. عملکرد نانولوله‌های عامل دار نشده بر روی سطح، تقریباً پایدار است و گاهی اوقات اصلاح سطوح آن‌ها مشکل می‌شود. به‌رحال، نانولوله‌های کربنی عامل دار شده به شدت فعالیت‌های سطحی نانولوله کربنی را افزایش داده و ارتباط آسان‌تری با گروه‌های اصلاحی مورد نیاز پیدا می‌کند.

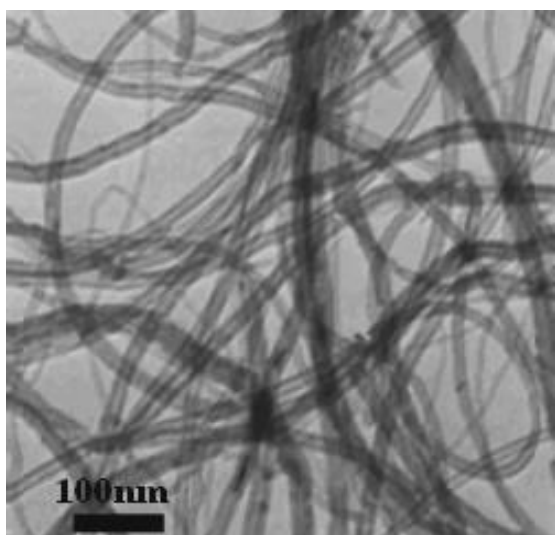
۳- تهیه نانوسیال

به‌طور کلی نانولوله‌های کربنی را می‌توان از سه روش متفاوت تولید نمود. این روش‌ها شامل رسوب بخار شیمیایی^۱، سایش لیزری و تخلیه قوس الکتریکی می‌باشند. در میان این روش‌ها رسوب بخار شیمیایی به دلیل ساده بودن، بالا بودن بازدهی و قیمت مناسب به‌عنوان مناسب‌ترین روش خصوصاً برای تولید ابعاد بزرگ‌تر نانولوله‌ها شناخته شده است [۲۸-۳۱].

^۱ CVD

وات در فرکانس ۲۴ کیلوهرتز به مدت ۴ ساعت برای در هم شکستن کلوخه‌های ذرات و رسیدن به پایداری مناسب، تهیه شده است. لازم به ذکر است در هر مرحله قبل از معلق سازی ذرات در دستگاه اولتراسونیک، نانولوله در همزن مغناطیسی به مدت دو ساعت قرار می‌گیرد. بعد از گذشت ۴۸ ساعت هیچ رسوبی (با چشم غیرمسلح) در نانوسیال مشاهده نگردید.

عکس ارسالی از میکروسکوپ الکترونی^{۱۱} از نانولوله چند جداره عامل دار شده که برای تخمین اندازه و شکل نانولوله‌ها استفاده شده است در شکل ۲ آورده شده است. این روش معمولاً توسط طیف گسترده‌ای از محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳-۳۴].



شکل ۲ عکس TEM از نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده

۴- پردازش داده‌ها

بازدهی حرارتی نانوسیالات در یک مدار گردشی برای یک لوله به دو ترم ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت تفکیک می‌شود. با استفاده از اصل بقای انرژی برای یک حجم کنترل دیفرانسیلی از سیال داخل لوله مسی، معادله ۱ به قرار زیر حاصل می‌گردد.

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{P}{\dot{m}C_p} h(T_s - T_b) \quad (1)$$

به‌طور کلی برای تهیه نانوسیال، دو روش مختلف بکار گرفته می‌شود: تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای. در روش اول، نانوذرات با تکنیک محلول شیمیایی و یا رسوب فیزیکی بخار همزمان با آماده‌سازی نانوسیال، تهیه می‌شوند. از آنجائی که در این روش پروسه‌هایی مانند خشک کردن و تعلیق وجود ندارد، کلوخه شدن نانوذرات در نانوسیال به حداقل می‌رسد و سیال حاصل پایداری بیشتری خواهد داشت. متأسفانه یکی از معایب روش تک‌مرحله‌ای این است که تنها برای سیالات با فشار بخار کم امکان‌پذیر می‌باشد. اما در روش دومرحله‌ای، نانوذرات ابتدا به‌طور مجزا تولید شده و پودر خشک حاصل می‌گردد و در گام بعدی نانوذرات در سیال معلق می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به گستردگی کاربرد آن در محدوده وسیعی از نانوذرات و سیالات پایه بدون محدودیتی که در روش اول ذکر شد، اشاره کرد. اما جلوگیری از کلوخه شدن ذرات و ایجاد پایداری نانوسیال از مسائلی است که باید در این روش حل گردد.

استفاده از سورفکتانت و عامل دار کردن نانولوله کربنی، دو راهکار مفید و ضروری برای حل مشکل فوق‌الذکر می‌باشد. اگرچه فعال‌کننده‌های سطحی زیادی مثل سدیم لورنت، سدیم دودسیل سولفات و گام عربیک^۹ برای اصلاح سطح مولکول آب‌گریز نانولوله کربنی استفاده می‌شوند و آن را به سوسپانسیون با پایداری بیشتر ارتقاء می‌دهند، اما متأسفانه این فعال‌کننده‌ها بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تأثیر منفی می‌گذارند [۳۲]. با توجه به موارد فوق، روش دومرحله‌ای و نانولوله‌های عامل دار شده در مطالعه حاضر بکار گرفته شده است.

در این تحقیق، آب خالص به‌عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار گرفته است. نانوسیال مورد استفاده از نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده با عامل کربوکسیل در کسرهای حجمی ۰/۰۱ (٪)، ۰/۰۸ (٪)، ۰/۰۴ (٪)، ۰/۰۲ (٪)، ۰/۰۱ (٪)، ۰/۰۵ (٪) و ۰/۰۲ (٪) در آب مقطر با استفاده از دستگاه اولتراسونیک با توان ۴۰۰

^{۱۱}TEM

^۹Gum arabic

$$U_h = \left[\left(\frac{VdC_p U_{\rho} Ln \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}}}{L} \right)^2 + \left(\frac{\rho d C_p Ln \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}}}{U_v} \right)^2 + \left(\frac{\rho V C_p U_d Ln \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}}}{L} \right)^2 + \left(\frac{\rho V d C_p U_{\rho} Ln \frac{\Delta T_{i,s}}{\Delta T_{o,s}}}{L^2} \right)^2 + \left(\frac{\rho V d C_p U_{\Delta T_{i,s}}}{L} \right)^2 + \left(\frac{\rho V d C_p U_{\Delta T_{o,s}}}{L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$U_{Nu} = \left[\left(\frac{d}{k} U_h \right)^2 + \left(\frac{h}{k} U_d \right)^2 + \left(\frac{hd}{k^2} U_k \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$U_f = \left[\left(\frac{2d}{\rho LV^2} U_{\Delta P} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta P}{\rho LV^2} U_d \right)^2 + \left(\frac{2\Delta P d}{\rho^2 LV^2} U_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta P d}{\rho^2 LV^2} U_L \right)^2 + \left(\frac{4\Delta P d}{\rho LV^3} U_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

۵- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

قبل از بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات، خواص ترموفیزیکی آن می‌بایست به‌دقت اندازه‌گیری شود.

۵-۱- دانسیته و ظرفیت حرارتی ویژه

چگالی مؤثر نانوسیال توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۳۶].

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1-\phi) \rho_f \quad (12)$$

ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$c_{p,nf} = \frac{\phi(\rho c_p)_p + (1-\phi)(\rho c_p)_f}{\rho_{nf}} \quad (13)$$

که در آن $C_{p,p}$ و $C_{p,f}$ ، $C_{p,nf}$ به ترتیب ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال، آب و ذره می‌باشند.

۵-۲- اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

با توجه به پیچیدگی ساختار نانوسیال، بسیاری از مدل‌های ارائه‌شده از پیش‌بینی دقیق ضریب هدایت حرارتی عاجزند. بنابراین در این تحقیق ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به‌طور آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شود.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی بکار گرفته می‌شود که از جمله این روش‌ها می‌توان به سیم داغ گذرا [۳۷]، صفحات موازی پایا [۳۸]، سلول استوانه‌ای

از جداسازی متغیرها و انتگرال‌گیری خواهیم داشت:

$$Ln \frac{(\Delta T_0)}{\Delta T_i} = \frac{-\rho L}{\dot{m} C_p} \left(\frac{1}{L} \int_0^L h dx \right) \quad (2)$$

پس از ساده‌سازی:

$$\frac{\Delta T_0}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{b,o}}{T_s - T_{b,i}} = \exp\left(\frac{-\rho L \bar{h}}{\dot{m} C_p}\right) \quad (3)$$

پس از مرتب کردن معادله (۳) به رابطه زیر خواهیم رسید.

$$\bar{h} = \frac{\dot{m} C_p}{\rho L} Ln\left(\frac{T_s - T_{b,i}}{T_s - T_{b,o}}\right) \quad (4)$$

دمای بالک توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$T_b = \frac{T_{b,i} + T_{b,o}}{2} \quad (5)$$

در نهایت، عدد رینولدز و عدد ناسلت مطابق زیر تعریف می‌شوند.

$$Re = \frac{\bar{V} d}{\nu} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{\bar{h} d}{k}$$

۴-۱- آنالیز عدم قطعیت

عدم قطعیت پارامترهای اصلی انتقال حرارت که در جدول ۲ آورده شده است، بر پایه روش ارائه شده به‌وسیله کلین و مکینتاک [۳۵] محاسبه شده است. این روش به‌وسیله فکور پاکدامن و همکاران [۳۶] نیز استفاده شده است. با فرض معادله زیر می‌توان عدم قطعیت پارامتر R را محاسبه نمود.

$$U_R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial V_i} U_{V_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

که در آن U_{V_i} و U_R به ترتیب عدم قطعیت‌های وابسته به پارامتر R بوده و متغیرهای مستقل V_i می‌باشند. بعلاوه n تعداد متغیرهای مستقل است. معادلات ۸-۱۱ برای محاسبه مقدار عدم قطعیت پارامترهای عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بکار رفته است [۳۶].

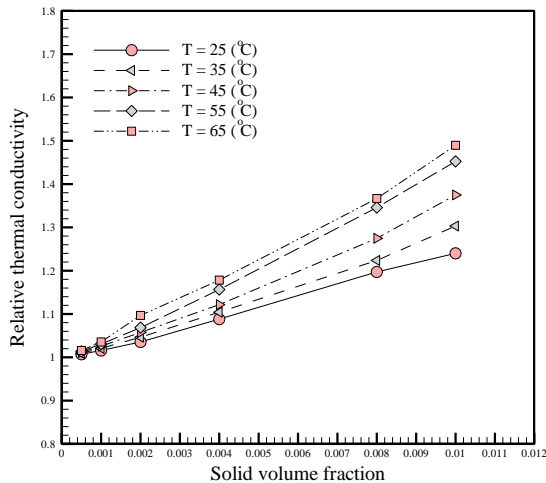
$$U_{Re} = \left[\left(\frac{d}{V} U_V \right)^2 + \left(\frac{V}{V} U_d \right)^2 + \left(\frac{Vd}{V^2} U_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

همچنین ضریب هدایت حرارتی با افزایش کسر حجمی، افزایش می‌یابد.

۵-۳- مدل پیشنهادی

به دلیل عدم وجود رابطه‌ای مستقل به‌منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نانولوله کربنی عامل دار- آب، در این تحقیق، یک رابطه تجربی برای ضریب هدایت حرارتی به‌وسیله برازش منحنی، بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، ارائه شد.

$$\frac{k_{nf}}{k_w} = 0.7957T^{(0.0589+8.621\phi)} \quad (14)$$



شکل ۳ ضریب هدایت حرارتی نسبی بر حسب کسر حجمی در دماهای مختلف

۵-۴- ویسکوزیته دینامیکی

رفتار رئولوژیک و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال عامل دار شده نانولوله کربنی چند جداره در آب به‌وسیله ویسکومتر بروکفیلد اندازه‌گیری شد که این ویسکومتر به همراه یک حمام کنترل دما بوده و محصول آزمایشگاه مهندسی بروکفیلد ایالات متحده می‌باشد. تغییرات ویسکوزیته نسبی $(\frac{\mu_{nf}}{\mu_w})$ سیال عامل بر حسب دمای بالک سیال در شکل ۴ آورده شده است.

[۳۹]، نوسانات دمایی [۴۰] و تری امگا^{۱۱} [۴۱] اشاره نمود. در بررسی حاضر از روش سیم داغ گذرا به دلیل سرعت بالا و دقت مطلوب جهت اندازه‌گیری، استفاده شده است [۴۲]. ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره عامل دار شده با کربوکسیل در آب در کسرهای حجمی مختلف به‌وسیله دستگاه کی‌دی‌تو پرو^{۱۲} ساخت کمپانی کی‌کیگان^{۱۳} اندازه‌گیری شده است. این وسیله بر اساس روش سیم داغ گذرا عمل می‌کند. دستگاه کی‌دی‌تو اندازه‌گیری‌ها را در فواصل یک ثانیه در یک دوره ۹۰ ثانیه‌ای انجام می‌دهد. به‌طور معمول، پراب اندازه‌گیری شامل یک سوزن همراه با گرم‌کن و سنسور دما می‌باشد. جریان از گرم‌کن عبور داده شده و دمای پراب در طول زمان کنترل می‌شود. دستگاه کی‌دی‌تو بعد از تحلیل دمای پراب، ضریب هدایت حرارتی را تعیین می‌کند. سیال نمونه در یک حمام دمایی جهت پایدار شدن دما و رسیدن به دمای موردنظر با دقت $\pm 5\text{ C}$ قرار می‌گیرد. سپس دستگاه داده را تحلیل کرده و خطای دمایی نمونه را اصلاح می‌کند.

نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به ضریب هدایت آب، "ضریب هدایت حرارتی نسبی" تعریف می‌شود. شکل ۳ ضریب هدایت نسبی اندازه‌گیری شده برای نانوسیال عامل دار شده نانولوله کربنی چند جداره در آب با عامل کربوکسیل را با تابعیت کسر حجمی در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

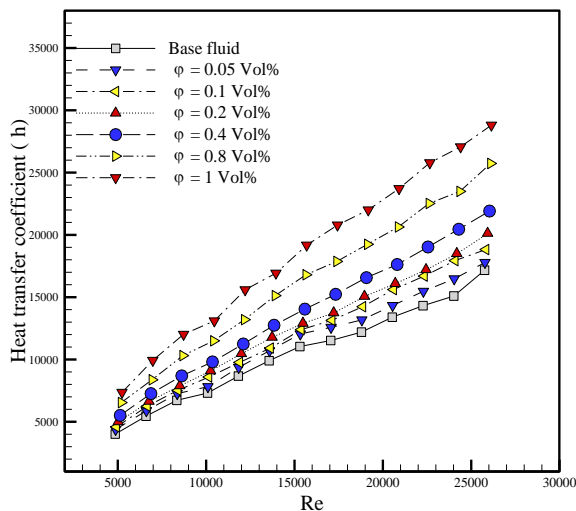
همان‌طور که ملاحظه می‌گردد وقتی دما افزایش می‌یابد، ضریب هدایت حرارتی در کلیه محدوده کسر حجمی خصوصاً در کسرهای حجمی بالاتر افزایش چشمگیری می‌یابد. علت این رفتار این است که وقتی دمای سیال افزایش می‌یابد، در هم شکستن انباشتگی نانوذرات آسان‌تر صورت گرفته و نانوسیال به سطح پایداری و یک نواختگی بهتری می‌رسد. علاوه بر آن، حرکات تصادفی نانوذرات با افزایش دما بیشتر شده و در پی آن انرژی درون سیال سریع‌تر منتقل می‌گردد.

^{۱۱}Decagon

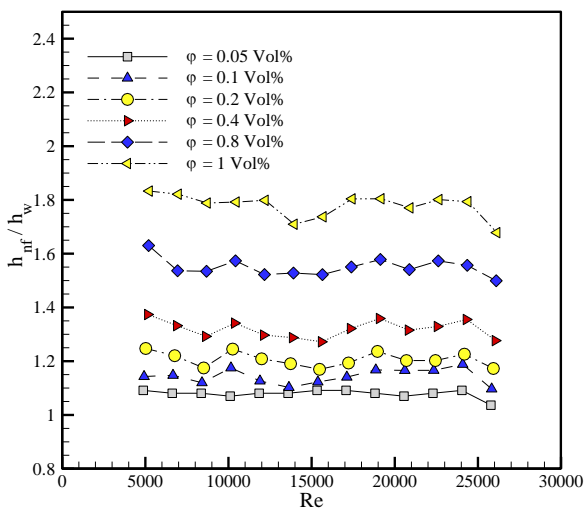
^{۱۲}3ω

^{۱۳}KD2 Pro

بر اساس ادعای پاک و چو [۲۱] و ژوان و لی [۲۲]، این نسبت مستقل از عدد رینولدز است. همچنین در مقابل آن، بر اساس نتایج فاکین و نصر [۴۳] با افزایش عدد رینولدز انتقال حرارت نانوسیال افزایش می‌یابد.



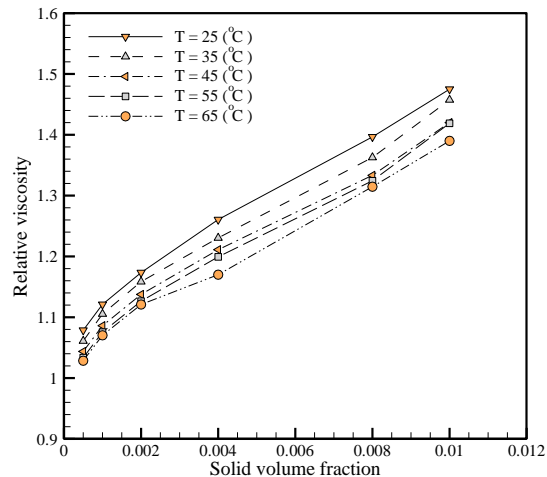
شکل ۵ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب عدد رینولدز در جریان توربولانس



شکل ۶ میزان افزایش ضریب انتقال حرارت بر اساس نتایج حاصل از بکار بردن نانوسیال

۲-۶- افت فشار

اندازه‌گیری افت فشار نانوسیال در کنار بازدهی انتقال حرارت آن برای به‌کارگیری نانوسیال در واحدهای صنعتی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افت فشار در راستای لوله



شکل ۴ ویسکوزیته نسبی نانوسیال بر حسب کسر حجمی در دماهای مختلف

مطابق این شکل برای کل نمونه‌های سیال مورد آزمایش در کسرهای حجمی مختلف، رفتار ویسکوزیته با افزایش دما نزولی است. همچنین مطابق انتظار، مقادیر ویسکوزیته نسبی در کسرهای حجمی بالا بیشتر می‌باشد.

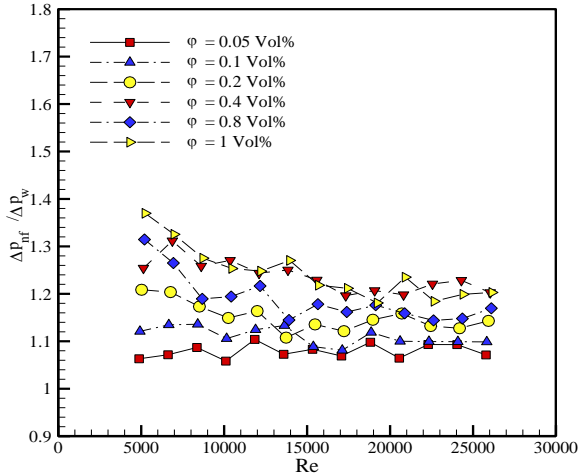
۶- بازدهی انتقال حرارت و افت فشار

۶-۱- ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال

شکل ۵ ضریب انتقال حرارت نانوسیال و سیال پایه (آب) را بر حسب عدد رینولدز برای جریان توربولانس توصیف می‌کند. همان‌گونه که دیده می‌شود نانولوله‌های کربنی میزان انتقال حرارت را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی افزایش می‌یابد و این مقدار همان‌طور که قبلاً اشاره شد در یک عدد رینولدز مشابه از سیال پایه (آب) بیشتر است. نسبت ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال به سیال پایه بر حسب عدد رینولدز در کسرهای حجمی مختلف، در شکل ۶ ارائه شده است.

بر اساس این شکل در رژیم جریان مغشوش تأثیر عدد رینولدز بر افزایش انتقال حرارت نانوسیال بسیار کم و یا بی‌اثر می‌باشد. در این شکل کماکان، تأثیر حضور نانوذرات و افزایش کسر حجمی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی به‌وضوح دیده می‌شود.

مغشوش در کسرهای حجمی مختلف و انجام آنالیز حساسیت به نتیجه‌گیری بهتر و قضاوت درباره قابلیت‌های کاربردی نانوسیالات کمک کنند.



شکل ۷ مقادیر افت فشار نانوسیال نسبت به افت فشار در سیال پایه بر حسب عدد رینولدز

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق استفاده از نانوسیال عامل دار شده نانولوله کربنی چند جداره در آب با عامل کربوکسیل در یک لوله مستقیم مسی، به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیر اضافه کردن نانولوله یا افزایش کسر حجمی بر ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته دینامیکی، خصوصیات انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در جریان توربولانس بود. برای همه کسرهای حجمی، ضریب هدایت حرارتی نسبی بالاتر از یک به دست آمد و بالاترین مقدار ضریب هدایت حرارتی به بیشترین کسر حجمی تعلق داشت. با افزایش دما، در کلیه محدوده کسر حجمی ضریب هدایت حرارتی افزایش چشمگیری داشت. برای نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره با کسرهای حجمی ۰/۰۵٪ و ۱٪ میانگین افزایش ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر ۷/۸٪ و ۷۷/۹۳٪ به دست آمد.

مستقیم، به طور تجربی توسط فشارسنج دیفرانسیلی اندازه‌گیری شده است. افت فشار اندازه‌گیری شده در طول لوله که برای محاسبه ضریب اصطکاک استفاده می‌شود، مطابق رابطه زیر است [۴۴]:

$$f = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2 \frac{d}{L}} \quad (15)$$

شکل ۷ نسبت افت فشار نانوسیال به سیال پایه $\Delta P_{nf}/\Delta P_w$ بر حسب عدد رینولدز در کسرهای حجمی مختلف نشان می‌دهد.

افت فشار در کسر حجمی ۱٪ نانوسیال تقریباً ۳۷٪ افزایش می‌یابد. نانوسیالات رقیق توان پمپ را افزایش می‌دهند، از این رو یافتن کسر حجمی بهینه برای هر سیستم نانوسیال برای رسیدن به انتقال حرارت بیشتر و کاهش مقاومت جریان ضروری است. همان‌گونه که در شکل ۶ نسبت ضریب انتقال حرارت آورده شد و با توجه به تفاوت موجود میان کسر حجمی ۰/۱٪ با سایر کسرهای حجمی در این شکل، می‌توان دریافت که در تمامی رینولدزهای مربوط به کسر حجمی ۰/۱٪، عملکرد نانوسیال نسبت به سایر کسرهای حجمی بهتر می‌باشد. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که افزایش افت فشار بیشینه ۳۷ درصدی در این کسر حجمی، افزایش حدود ۸۰ درصدی در نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی را به همراه دارد. مقایسه نسبت افت فشار و نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی در تمامی رینولدزهای مورد مطالعه، بهینه بودن کسر حجمی ۰/۱٪ برای کاربردهای صنعتی و تجاری را به اثبات می‌رساند.

۷- پیشنهادات

لازم به ذکر است که این تحقیق می‌تواند به عنوان مقدمه‌ای برای سایر تحقیقات با محوریت بهینه‌سازی و بررسی ضریب عملکرد حرارتی و راندمان این نوع نانوسیال در مبدل مورد توجه قرار گیرد. سایر تحقیقات در این زمینه می‌تواند با بررسی ضریب عملکرد حرارتی، راندمان جریان آرام و

۹- فهرست علائم اختصاری

حروف یونانی	ضریب اصطکاک	f
لزجت دینامیکی، (kg/ms)	μ	ضریب انتقال حرارت جابجایی، (W/m ² K)
چگالی، (kg/m ³)	ρ	ضریب رسانندگی حرارتی، (W/m K)
کسر حجمی نانوسیال	φ	طول لوله، (m)
ویسکوزیته سینماتیکی (Pa.s)	ν	دبی جرمی، (kg/s)
		عدد ناسلت
		Nu
زیر نویس ها		فشار، (pa)
نانوسیال	nf	عدد پرانتل، (v/ α)
نانوذرات	p	سرعت میانگین، (m/s)
سیال پایه	bf	عدد رینولدز
میانگین	m	زمان، (s)
ورودی	in	
خروجی	Out	
بالک	b	
آب	w	
عدم قطعیت	U	

۱۰- مراجع

- [1] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, In: Proceedings of the 1995 ASME international mechanical engineering congress and exposition, San Francisco, CA, USA, 1995.
- [2] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R.A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 49, pp. 240-250, 2006.
- [3] L. Chen, H. Xie, Y. Li, W. Yu, Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction, Thermochem. Acta, Vol. 477, pp. 21-24, 2008.
- [4] L. Chen, H. Xie, Surfactant-free nanofluids containing double- and single-walled carbon nanotubes functionalized by a wet-mechanochemical reaction, Thermochem. Acta, Vol. 497, pp. 67-71, 2010.
- [5] S.U.S. Choi, Z.G. Zang, W. Yu, F.E. Lookwood, E.A. Grulke, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension, Appl. Phys. Lett, Vol. 79, pp. 2252-2254, 2001.
- [6] M.J. Assael, C.F. Chen, I. Metaxa, W.A. Wakeham, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, Int. J. Thermophys, Vol. 25, pp. 971-985, 2004.
- [7] R. Prasher, P. Bhattacharya, P.E. Phelan, Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids), Phys. Rev. Lett., Vol. 94, 025901, 2005.
- [8] M. Liu, M.C. Lin, I.T. Huang, Ch. Wang, Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 32, pp. 1202-1210, 2005.
- [9] Z. Taleai, AR. Mahjoub, AM. Rashidi, A. Amrollahi, ME. Meibodi. The effect of functionalized group concentration on the stability and thermal conductivity of carbon nanotube fluid as heat transfer media, Int Commun Heat Mass; Vol. 38, pp. 513-7, 2011.
- [10] P. Garg, J.L. Alvarado, Ch. Marsh, Th.A. Carlson, D. Kessler, K. Annamalai, An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat transfer performance of multi-wall carbon nanotube-based aqueous nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 52, pp. 5090-5101, 2009.

- [11] G.H. Ko, K. Heo, K. Lee, D.S. Kim, Ch. Kim, Y. Sohn, M. Choi, An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4749-4753, 2007.
- [12] I. Madni, Ch. Hwang, S-D. Park, Y-H. Choa, H-T. Kim, Mixed surfactant system for stable suspension of multiwalled carbon nanotubes, *Colloidals Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 358, pp. 101-107, 2010.
- [13] A. Indhuja, K.S. Suganthi, S. Manikandan, K.S. Rajan, Viscosity and thermal conductivity of dispersions of gum arabic capped MWCNT in water: Influence of MWCNT concentration and temperature, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 44, pp. 474-479, 2013.
- [14] A. Amrollahi, A. Rashidi, R. Lotfi, M.E. Meibodi, K. Kashefi, Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 717-723, 2010.
- [15] A. Ghajar, L.-M. Tam, Heat transfer measurements and correlations in the transition region for a circular tube with three different inlet configurations, *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 8, pp. 79-90, 1994.
- [16] S. Kakac, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 52 (13-14), pp. 3187-3196, 2009.
- [17] P. Keblinski, S. Phillpot, S. Choi, J. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45 (4), pp. 855-863, 2002.
- [18] A. Ghajar, L.-M. Tam, Flow regime map for a horizontal pipe with uniform wall heat flux and three inlet configurations, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 10 (3), pp. 287-297, 1995.
- [19] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, et al., Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Curr. Appl. Phys.*, Vol. 9 (2), pp. 119-123, 2009.
- [20] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R.A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240-250, 2006.
- [21] B. Pak, Y. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transfer*, Vol. 11 (2), pp. 151-170, 1998.
- [22] Q. Li, Y. Xuan, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, *Sci. China*, Vol. 45 (4), pp. 408-416, 2002.
- [23] P. Garg, J. Alvarado, C. Marsh, T. Carlson, D. Kessler, K. Annamalai, An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat transfer performance of multi-wall carbon nanotube-based aqueous nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 52 (29), pp. 5090-5101, 2009.
- [24] M.A. Akhavan-Behabadi, M. Fakoor Pakdaman, M. Ghazvini, Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 556- 564, 2012.
- [25] D. Ashtiani, M.A. Akhavan-Behabadi, M. Fakoor Pakdaman, An experimental investigation on heat transfer characteristics of multi-walled CNT-heat transfer oil nanofluid flow inside flattened tubes under uniform wall temperature condition, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 1404-1409, 2012.
- [26] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [27] F.M. White, *Viscous Fluid Flow*, second ed., McGraw Hill, New York, 2006.
- [28] T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization, *Chemical Physics Letter*, Vol. 243, pp. 49-54, 1995.
- [29] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y.H. Lee, S.G. Kim, A.G. Rinzler, D.T. Colbert, G.E. Scuseria, D. Tomanek, J.E. Fischer, R.E. Smally, Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes, *Science*, Vol. 273, pp. 483-487, 1996.
- [30] K. Hernadi, A. Fonseca, J.B. Nagy, A. Siska, I. Kiricsi, Production of nanotubes by the catalytic decomposition of different carbon-containing compounds, *Applied Catalysis A*, Vol. 199, pp. 245-255, 2000.
- [31] Y. Li, J. Chen, Y. Qin, L. Chang, Simultaneous production of hydrogen and nanocarbon from decomposition of methane of a nickel-based catalyst, *Energy Fuels*, Vol. 14, pp. 11888-11894, 2000.
- [32] R. Lotfi, A.M Rashidi, A. Amrollahi, Experimental study on the heat transfer enhancement of MWNT-water nanofluid in a shell and tube heat exchanger, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 108-111, 2012.
- [33] Kh. Wongcharee, S. Eiamsa-ard, Enhancement of heat transfer using CuO/ water nanofluid and twisted tape with alternate axis, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 38 (6), pp. 742-748, 2011.
- [34] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids, *J. Heat Transfer*, Vol. 128 (3), pp. 240-250, 2006.

- [35] S.J. Kline, F.A. McClintock, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mech. Eng.* 75, pp. 3-8, 1953.
- [36] M. Fakoor Pakdaman, M.A. Akhavan-Behabadi, P. Razi, An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes, *Exp. Therm. Fluid. Sci.*, Vol. 40, pp. 103-111, 2012.
- [37] D.H. Yoo, K.S. Hong, H.S. Yang, Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids, *Thermochimica Acta* 455, pp. 66-69, 2007.
- [38] A.R. Challoner, R.W. Powell, Thermal conductivities of liquids: new determinations for seven liquids and appraisal of existing values, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 238, pp. 90-106, 1956.
- [39] H. Kurt, M. Kayfeci, Prediction of thermal conductivity of ethylene glycol/water solutions by using artificial neural networks, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2244-2248, 2009.
- [40] W. Czarnetzki, W. Roetzel, Temperature oscillation techniques for simultaneous measurement of thermal diffusivity and conductivity, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 16, pp. 413-422, 1995.
- [41] D.G. Cahill, Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the 3w method, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 61, pp. 802-808, 1990.
- [42] V. Iranidokht, S. Hamian, N. Mohammadi, M.B. Shafii, Thermal conductivity of mixed nanofluids under controlled pH conditions, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 74, pp. 63-71, 2013.
- [۴۳] S.M. Fotukian, M. Nasr Esfahany, Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 37 (2), pp. 214-219, 2010.
- [۴۴] F.P. Incropera, D.P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, fourth ed., John Wiley, New York, 1996.